



MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

BMF KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet
és
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet

7. ELŐADÁS: FÉNYVEZETŐ SZÁLAS ÉRZÉKELŐK I

2008/2009 tanév 2. félév

1

7. ELŐADÁS: FÉNYVEZETŐ SZÁLAS OPTIKAI ÉRZÉKELŐK

1. Fotonika: fénytávközlés és üvegszálás optikai hullámvezetők.
2. Fényvezető szálak tulajdonságai.
3. Fényemittáló diódák (LED) és lézerdiodák (LD).
4. Fényvezető szálak érzékelők általános tulajdonságai. Érzékelési mechanizmusok: intenzitás, fázis, polarizáció, hullámhossz és spektrális eloszlás megváltozása. Érzékelő típusok: intrinsic, extrinsic és interferométeres.
5. Intrinsic fényvezető szálak szenzorok.
6. Fényvezető szál alapú interferométeres szenzorok.
7. Extrinsic fényvezető szálak szenzorok.

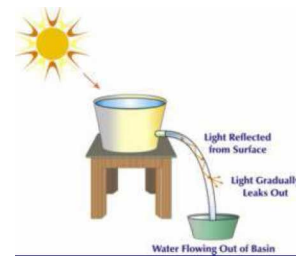
2

TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

A fényvezető szálak és optikai kábelek a fénytávközlés alapvető passzív elemei. A fénynek távközlési célra való felhasználása szinte egyidős az emberiséggel. A modern "ipari" korszakban az 1880-as években Alexander Graham Bell vettette fel először alkalmazását ilyen célra. Természetesen a fény szabad térben is terjed, de (különösen nagy távolságokra) az alapvető közeg a fényvezető (optikai) szál. Az optikai szálak felhasználása először a 60-as években került szóba, de az igazi áttörés a 70-es években következett be, amikor sikerült már 20 dB/km-nél kisebb veszteségű fényvezető szálakat előállítani, ami már jó eséllyel adott a fényszálak gyakorlati (híradástechnikai, távközlési) alkalmazására.

3

KLASSZIKUS MEGFIGYELÉS

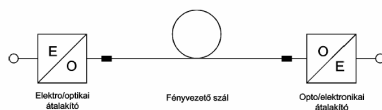


John Tyndall (1870)

4

BEVEZETŐ ÁTTEKINTÉS

A jelenlegi legkorszerűbb vezetékese adatátviteli módszer az üvegszálás technológia alkalmazása. Az információ fényimpulzusok formájában terjed egy fényvezető közegben (üvegszálon).



Optikai összekötetés vázlata

5

OPTIKAI HÁLÓZAT FELÉPÍTÉSE

Az optikai átviteli rendszer három komponensből áll:

az átviteli közegből (hajszálvékony üveg vagy szilikát) amit egy szilárd fénytörő réteg véd (szintén üveg vagy műanyag),

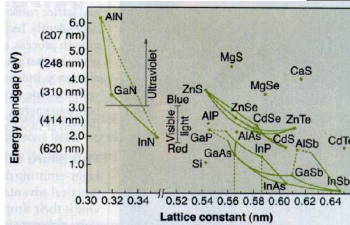
a fényforrásból (LED vagy lézerdioda),

és az érzékelőből, mely fototranzisztor vagy fotodióda, amelynek vezetési képessége a rájuk eső fény hatására megváltozik

6

FÉLVEZETŐ LÉZERANYAGOK

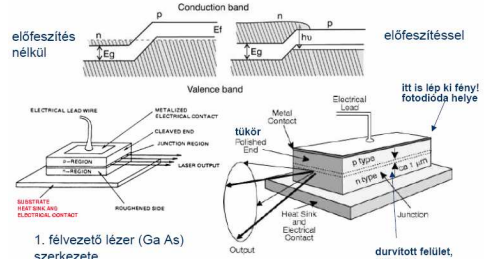
Félvezető anyag	Sávszélesség [eV]	λ [μm]
GaAs	1,428	0,868
InP	1,351	0,918
$\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$		0,65 – 0,9
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$		0,9 – 1,7
$\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$		6,3 – 30
GaN	3,39	0,366



7

FÉLVEZETŐ LÉZER, LÉZERDIÓDA

nyitó irányban előfeszített p - n átmenet



1. félvezető lézer (Ga As) szerkezete

8

(KETTŐS) HETEROÁTMENETES LÉZER

Az ilyen konstrukciójú lézerek esetén problémaként lépett fel, hogy a teljes fénytelsítményt nem lehet az aktív réteg belsejére korlátozni annak ellenére, hogy a nagy töltéshordozó-sűrűség megemeli az aktív réteg törésmutatóját és ezáltal hullámvezetőt képez a fény számára. A lézerműködéshez az erősítési feltételek teljesülnie kell, ami a korai kialakítású eszközöknél szobahőmérsékleten csak nagy küszöbáram, illetve áramsűrűség (10^5 A/cm^2) esetén teljesült. A dióda védelmének érdekében alacsony működési hőmérsékletet kellett biztosítani, illetve szobahőmérsékleten csak impulzus üzemben volt képes működni a lézer.

9

(KETTŐS) HETEROÁTMENETES LÉZER

A szobahőmérsékleti folyamatos működtetéshez csökkenteni kellett a fényvesztéséget az eszközben, illetve meg kellett akadályozni a diffúziós töltéshordozó elvándorlást az aktív rétegből. Ehhez bonyolultabb szerkezetű, heteroátmenetes lézert kellett építeni. A heteroátmenet akkor jön létre, ha olyan félvezető anyagokat érintkeztetünk atomi közelségben, amelyeknél a tiltott sáv nagysága különbözik. A heteroátmenetes lézerek nagyobb hatásfokkal és egy nagyságrenddel kisebb áramsűrűséggel működnek.

H. Kroemer, Proc. IEEE 51, 1782 (1963)
 Zs. I. Alferov, R. F. Kazarinov, szovjet szabadalom, No. 181737 (1963)
 Zs. I. Alferov, Fiz. Tekh. Poluprovodn. 1, 436 (1967)

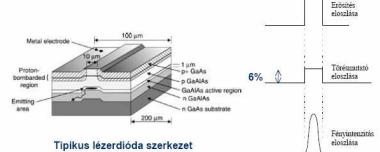
10

KETTŐS HETEROÁTMENETES LÉZER

Heteroátmenetes rétegszerkezet

több tiltott sávú és törésmutatójú félvezető rétegből

Kettős heteroszerkezetű GaAlAs-GaAs lézer felépítése



Tipikus lézerdióda szerkezet

11

KETTŐS HETEROÁTMENETS LÉZER

A fenti struktúrában két nagy tiltott sávszélességű anyag között található egy kis tiltott sávszélességű rész. Ebből a felépítésből következik, hogy a közbűlő részben nagy töltéshordozó koncentráció jön létre. Másrészt, mivel a kisebb tiltott sávszélesség nagyobb optikai törésmutatót jelent, a szerkezet önmagában egyben optikai hullámvezetőként is viselkedik. Így egyszerre megoldott a szűk helyre való nagymértékű töltéshordozó- és fotonkoncentráció.

12

KETTŐS HETEROÁTMENETS LÉZER

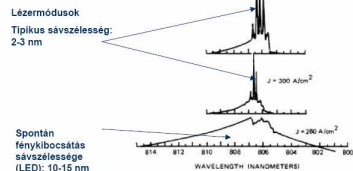
A létrejövő aktív réteg tehát szinte teljes mértékben csak a GaAs rétegre korlátozódik, amelynek szélessége a gyártás során rendkívül kis méretűre tervezhető. Egy további előnye annak, hogy az aktív réteget nagyobb sávzélességű anyagok határolják, hogy a fénytéljesítménynek az a része, amely az aktív rétegen kívül terjed, sokkal kisebb elnyelésnek van kitéve ebben az esetben, így a terjedési együttható is kisebb lesz ekkor, mint homoátmenet esetén.

Felfedezése óta megbízhatóság és élettartam szempontjából hatalmas fejlődésen ment keresztül a lézertiódó. A mai lézertiódók akár 10^7 óra üzemidőt is képesek teljesíteni.

13

LÉZER KARAKTERISZTIKÁK

Nyaláb spektrális jellemzői



14

FÉNYVEZETŐ SZÁLAS ÉRZÉKELŐK ÁLTALÁNOS TULAJDONSÁGAI

A fényvezető szál (illetve a szálvég) maga az érzékelő. Mérhethetnek többek között hőmérsékletet, nyomást, mechanikai feszültséget és rezgést, kémiai koncentrációt, stb.

Érzékelési mechanizmusok: a szálban terjedő fény intenzitása, fázisa, polarizációja, hullámhossza, időzítése és spektrális eloszlása (módustartalma) megváltozása a külső körülmények hatására.

15

FÉNYVEZETŐ SZÁLAS ÉRZÉKELŐK ÁLTALÁNOS TULAJDONSÁGAI

Előnyök:

1. Az optikai érzékelők működését sem a rádió-hullámok, sem a villámlás, sem más természetes elektromágneses zavarforrás nem befolyásolja (EMC - electromagnetic compatibility). Nem kell árnyékolás, zavarzűrés, stb.
2. Az érzékelő egyben a jelátviteli csatorna szerves része. Több érzékelő összekapcsolható, a jelek közösen továbbíthatók.

16

FÉNYVEZETŐ SZÁLAS ÉRZÉKELŐK ÁLTALÁNOS TULAJDONSÁGAI

3. A fényvezető szál már a gyártás során beépíthető a vizsgálandó szerkezetbe. A kvarc optikai szál ellenáll szélsőséges viszonyoknak is, kb. $1000\text{ }^\circ\text{C}$ -ig sem térfogatát sem súlyát nem változtatja meg. Az érzékelést végző optikai szál beontható pl. betonba, a fémek egy részébe is.

Hátrányok: Általában drágábbak mint az elektromos vagy elektromechanikus érzékelők. Költségnövelő tényező, hogy a fényszál típusú érzékelőket még nem gyártják nagy sorozatban.

17

OPTIKAI HULLÁMVEZETŐKÖN ALAPULÓ ÉRZÉKELŐK

Érzékelési elv: a mérendő mennyiség megváltoztatja az átvett vagy visszavert fényhullám jellemzőit (intenzitás, polarizáció, frekvencia, fázis). Generátor típusú működés is lehetséges: maga a mérendő közeg egyben a fényforrás is (pl. kemolumineszcencia).

Intenzitásmérés: az áthaladó vagy visszavert fény intenzitását mérik.

Spektrumanalízis: az áthaladó vagy visszavert fény spektrumának megváltozását mérik. Gyakorlatban adott hullámhosszon mért intenzitásváltozás mérésével helyettesítik.

18

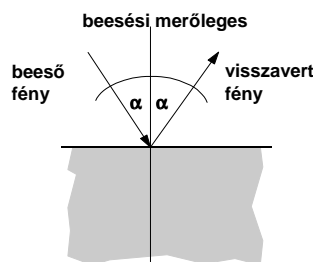
OPTIKAI HULLÁMVEZETŐKÖN ALAPULÓ ÉRZÉKELŐK

Fázisváltozás mérése: Terjedő vagy áthaladó fény fázisának eltolódását mérik. Ekkor a gerjesztés monokromatikus és koherens kell, hogy legyen. A fáziskülönbséget interferométerben intenzitásmérésre vezeték vissza.

Polarizáció változásának detektálása: poláros gerjesztésű fény polárszögének megváltozását mérik. Polárszűrőkkel szintén intenzitásmérésre vezeték vissza.

19

FÉNYVISSZAVERŐDÉS



Természetes, nempolarizált fény esetén a reflexió tényező a beesési szögtől függően változik. Merőleges beesés esetén

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}$$

20

FIZIKAI MŰKÖDÉS

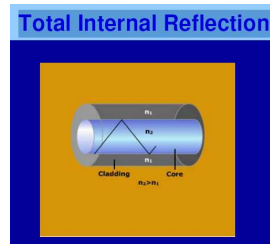
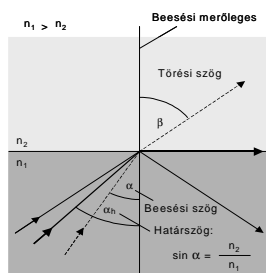
A fényvezető szálak működésének fizikai alapja a teljes visszaverődés jelensége.

Egy határszög felett a nagyobb törésmutatójú közegből a kisebb törésmutatójúba a fény nem tud kilépni, így teljes visszaverődést szenved. A fényvezető szálban a belső mag törésmutatója nagyobb, mint a külső héj anyagának törésmutatója, ez biztosítja a szál tengelyével közel párhuzamosan haladó fénysugarak vezetését.

A határszög a Snellius-Descartes törési törvényből határozható meg.

21

FÉNYTÖRÉS ÉS FÉNYVISSZAVERŐDÉS



A fény törése és visszaverődése két közeg határfelületén

22

A TELJES VISSZAVERŐDÉS

Ha n_1 az optikailag sűrűbb, n_2 pedig az optikailag ritkább közeg törésmutatója ($n_2 < n_1$), és a két közeget elválasztó határfelületre merőleges irányhoz képest a fénysugár beesési szöge θ_1 és θ_2 , akkor

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1$$

a teljes visszaverődés határán:

$$\sin \theta_2 = \sin 90^\circ = 1 = n_1 \sin \theta_{1h} / n_2$$

a határszög

$$\theta_{1h} = \arcsin(n_2 / n_1)$$

23

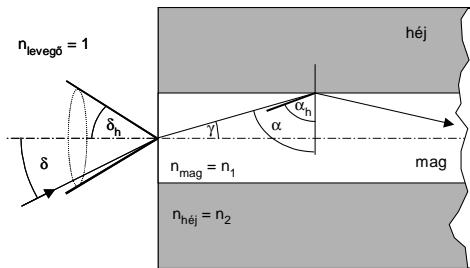
FÉNYVEZETÉS ÉS TÖRÉSMUTATÓ

A ún. gyengén vezető szálaknál a mag/héj határfelületen a törésmutató relatív változása $(n_1 - n_2) / n_1 = \Delta \ll 1$. Távközlési célra használt kábelekben általában $\Delta < 0,01$.

Pl. ha $n_1 = 1,5$, $n_2 = 1,485$, akkor $n_2 / n_1 = 0,99$. Ekkor a mag/héj határfelületen a teljes visszaverődés szöge $\arcsin 0,99 = 81,9^\circ$, azaz a szál tengelyével $90^\circ - 81,9^\circ = 8,1^\circ$ illetve ennél kisebb szöget bezáró fénysugarat vezet a szál.

24

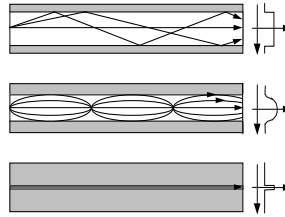
AKCEPTANCIASZÖG



Akceptanciaszög (δ), az ezen belül a szál végére beeső fénysugarat a szál "befogja".

25

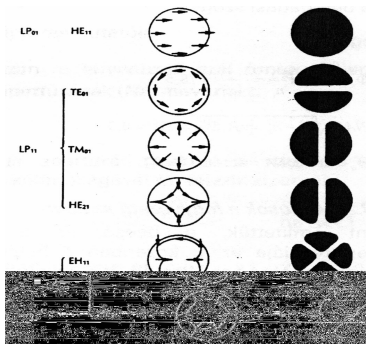
FÉNYVEZETŐ SZÁLTÍPUSOK



A fényvezető szálak működésének fizikai alapja a teljes visszaverődés. A szálban a mag törésmutatója nagyobb mint a héj törésmutatója. Többmódusú lépcsős indexű, többmódusú gradiens indexű, és egymódusú lépcsős indexű száltípusok

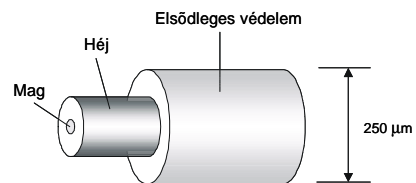
26

MÓDUSOK FÉNYVEZETŐ SZÁLBAN



27

OPTIKAI KÁBEL

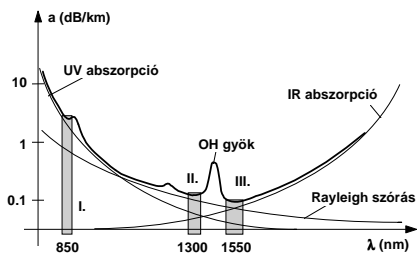


Mag (core): 6-60 μm
 Héj (cladding): 125 μm
 Primer bevonat: 250 μm
 Szekunder bevonat: 1000 μm
 Védőcső: 1-2 mm

[Az optikai szál kialakítása](#)

28

A CSILLAPÍTÁS HULLÁMHOSSZFÜGGÉSE

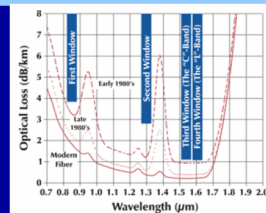


Fényvezető szál (olvasztott kvarc, SiO_2) csillapítási karakterisztikája. Átviteli "ablakok": I. – 850 nm, GaAs lézer, II. – 1200-1300 nm, minimális diszperzió, III. 1540-1450 nm, minimális csillapítás, InGaAsP/InP lézer.

29

OPTIKAI SZ CSILLAPÍTÁS HULLÁMHOSSZFÜGGÉSE

Attenuation in transmitted light



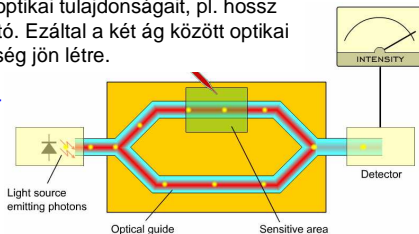
These window refers to a wavelength region that offers low optical loss. They sit between several large absorption peaks caused primarily by moisture in the fiber and Rayleigh scattering.

30

FÉNYSZÁL ALAPÚ INTERFEROMÉTER ÉRZÉKELŐK

Interferométer működési elve: a két optikai ág különböző hatásnak van kitéve. Az egyik ág (referencia) a külső hatások ellen védve van, a másik ág (szenzor) a külső hatásokra megváltoztatja optikai tulajdonságait, pl. hossz vagy törésmutató. Ezáltal a két ág között optikai úthossz különbség jön létre.

Mach-Zehnder-interferométer



FÁZISMODULÁCIÓ

Az átvitt fény fázisa az optikai úthossz változása miatt megváltozik. Oka: geometria úthossz és/vagy a törésmutató megváltozása, melyet az érzékelendő folyamat (pl. hőmérsékletváltozás, nyomásváltozás, kémiai hatás, stb.) hoz létre.

Optikai intenzitás az interferométerben (φ a fázisváltozás)

$$I = I_0 \cos^2(\varphi/2)$$

Egymódusú fényszál esetén az intenzitás maximális, ha $\varphi = 2\pi n$, illetve minimális ha $\varphi = (2n + 1)\pi$ (n egész szám).

38

FÉNYSZÁL ALAPÚ INTERFEROMÉTER ÉRZÉKELŐK

Interferométer alapú szenzorok érzékenysége nagy, de mérési tartományuk korlátozott (ekvivalens hossz maga a hullámhossz). Drágák is.

Interferométer elrendezések:

- Sagnac-interferométer
- Mach-Zehnder-interferométer
- Michelson-interferométer
- Fabry-Perot-Interferométer

39

SAGNAC-INTERFEROMÉTER

Az interferométer két ága ugyanabban a hurokban van, a fény a két ágban ellenkező irányban terjed.

Így a fáziseltolódás révén pl. a hurok forgása érzékelhető.

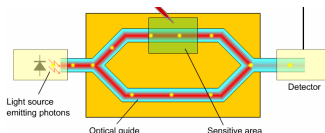
- Alkalmazás:
- forgás, gyorsulás, erő
 - akusztikai hullámhossz mérése
 - mágneses tér, áram

40

MACH-ZEHNDER INTERFEROMÉTER

Optikai úthossz

$$\Delta L = L_1 - L_2$$



Két egymódusú üvegszálból áll, az egyik ága a referencia a másik az érzékelő. A külső hatás megváltoztatja a fény fázisát, és a fáziskülönbség a kimenő jel. Ez az egyik legpontosabb optikai szenzor.

- Alkalmazás:
- mágneses tér, elektromos tér
 - gyorsulás, erő, távolság, nyomás
 - hőmérséklet
 - áram

41

MICHELSON-INTERFEROMÉTER

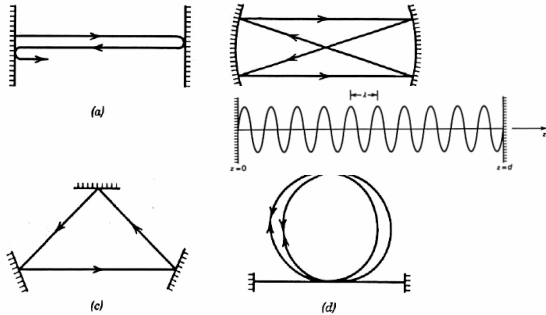
Működése hasonló, csak a felépítése különbözik a Mach-Zehnder interferométertől. A két ág végén egy-egy tükör van, így a fény oda-vissza befutja az ágakat.

$$\Delta L = 2(L_1 - L_2)$$

- Alkalmazások:
- Mint a Mach-Zehnder interferométer

42

FABRY-PEROT REZONÁTOR/INTERFEROMÉTER



F-P rezonátorok: (a) siktükör rezonátor, (b) gömbtükör rezonátor, (c) gyűrű rezonátor, (d) optikai szál rezonátor

FABRY-PEROT INTERFEROMÉTER SZENZOR

Az optikai közeg két végén tükör helyezkedik el (pl. a fényszál végén megfelelő reflexiós tényezőjű bevonat). A külső hatás "elhangelja" a rezonátort.

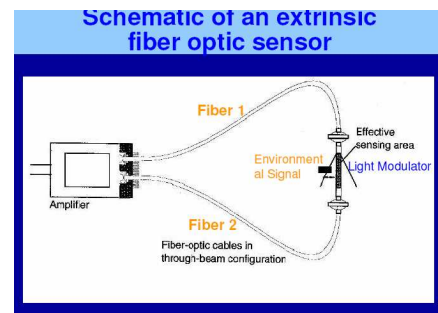
EXTRINSIC FÉNYSZÁL OPTIKAI SZENZOR

Extrinsic fényszál szenzor:

Az üvegszál mint hullámvezető a fénysugarat egy "fekete dobozba" vezeti, ahol a környezeti hatásokra a fény valamely paramétere megváltozik. A fekete doboz tartalmazhat optikai elemeket (p. tükör, lencse, stb.) gáz- és folyadék cellákat, és egyéb szerkezeteket, ami optikai fénynyalábot hoz éltre, modulálás, vagy átalakít. Ezt a jelet a szál elvezeti további

Tehát a fény valamelyik jellemzője a szálon kívül változik meg.

EXTRINSIC SZÁLOPTIKAI ÉRZÉKELŐ



VÉGE